تحلیل لرزه‌ای سیستم‌های ثانویه نصب شده بر عرشه سکوهای دریایی

محمد علی حجری[۱]، علی اکبر آقاکوچک[۲]*

[۱]کارشناس ارشد، سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ m.hajari@modares.ac.ir
[۲]استاد دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a_agha@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۲
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
سکوی دریایی
سیستم ثانویه
تجهیزات غیرسازه‌ای
تحلیل لرزه‌ای
اندرکنش سازه و سیستم ثانویه

چکیده

عرشه سکوهای دریایی دربردارنده تجهیزات مختلف است که تحریک زلزله می‌تواند نیروهای بزرگی را به آن‌ها و سازه سکو وارد نماید. در طراحی عرشه سکوهای دریایی عمدتا اندرکنش تجهیزات و سازه در نظر گرفته نمی‌شود که با واقعیت عملکرد لرزه‌ای سازه متفاوت است. برای مطالعه این موضوع مدل ۳ بعدی سکوی نمونه‌ای به همراه سیستم ثانویه‌ای که در عرشه قرار گرفته است، با نرم‌افزار OpenSees ساخته شده و تحت اثر شتابنگاشت‌های مختلف زلزله بررسی شده است. شتابنگاشت‌ها در دو سطح مختلف در نظر گرفته شده‌اند، در سطح اول سازه رفتار خطی داشته و در سطح دوم، رفتار سازه، غیرخطی شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، در مورد سیستم‌های ثانویه‌ای که دوره تناوب پایینی دارند، می‌توان از اندرکنش سازه و سیستم ثانویه صرفنظر نمود، اما با افزایش دوره تناوب سیستم ثانویه، لازم است اندرکنش این سیستم با سازه اصلی در نظر گرفته شده و اثرات زلزله بر آن‌ها ارزیابی شود. مطابق با نتایج بدست آمده، در نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی کمتر از ۷، برای حالت خطی و نسبت فرکانسی کمتر از ۱۰، برای حالت غیرخطی، پاسخ‌های بدست آمده از روش بدون در نظر گرفتن اندرکنش محافظه کارانه خواهد بود.

Seismic analysis of secondary systems installed on topside of offshore platforms

Mohammad Ali Hajari[1], Ali Akbar Aghakouchak[2*]

[1]Msc Marine Structures, Civil and Environmental Faculty,Tarbiat Modares University; m.hajari@modares.ac.ir
[2]Professor,Civil and Environmental Faculty,Tarbiat Modares University; a_agha@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 31 Oct. 2014
Accepted: 3 Aug. 2015
Available online: 22 Sep. 2015

Keywords:
offshore platform
secondary system
nonstructural components
seismic analysis
interaction between structure and secondary system

ABSTRACT

Topsides of offshore platforms contain different equipment, therefore earthquake excitation may impose large forces on them. However during design of these topsides, the interaction of the secondary systems and primary structure is not usually considered, which may result in a non-realistic response of structure. In order to study this subject, by using OpenSees software, a 3D model of a typical platform in the Persian Gulf is constructed and analyzed, when subjected to different records of ground motion. These records are scaled for two earthquake levels. In the first level the structure is in elastic condition but for the second level it behaves inelastically. According to the results, for secondary systems with low periods of vibration, interactions between structure and secondary system can be neglected. But when the period of secondary system is increased, it is necessary to consider interactions effects. According to the results of this research, when ratio of the frequency of secondary system to primary structure is less than 7 or 10 for linear and nonlinear conditions, respectively, a conservative estimate of response may be obtained by neglecting the interaction effects.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

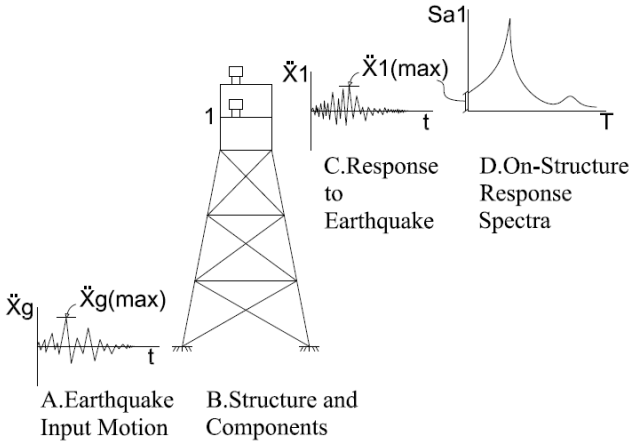
۱- مقدمه

سیستم‌های ثانویه تجهیزات و اجزای غیرباربری هستند که از آن‌ها انتظار تحمل بارهای وارده به سازه نمی‌رود، اما در هنگام زلزله ممکن است متحمل نیروهای شدیدی شوند. سکوهای دریایی یکی از سازه‌هایی است که بر روی عرشه آن‌ها انواع مختلف تجهیزات استخراج، پالایش و انتقال مواد نفتی و گازی وجود دارد و با توجه به شرایط خاص این سازه‌ها لازم است طراحی لرزه‌ای این تجهیزات به خوبی مورد ارزیابی قرار بگیرد.

به طور کلی در طراحی لرزه‌ای سیستم‌های ثانویه، دو روش تحلیل وجود دارد، یک روش بدون در نظر گرفتن اندرکنش و دیگری با در نظر گرفتن آن. حالت ساده تحلیل سیستم‌های ثانویه، حالتی است که اندرکنش سازه با تجهیزات در نظر گرفته نمی‌شود. در این روش ابتدا سازه اصلی تحت اثر زلزله تحلیل شده و پاسخ سازه در نقاطی که سیستم ثانویه به آن متصل است بدست می آید. آنگاه از این پاسخ به عنوان ورودی سیستم ثانویه استفاده شده و پاسخ آن محاسبه می گردد. یک روش مناسب برای تحلیل بدون در نظر گرفتن اندرکنش، روش طیف پاسخ طبقه است که در آن، سازه صرفا با در نظر گرفتن وزن تجهیزات ثابت، تحت اثر یک شتابنگاشت زلزله‌ی خاص تحلیل می‌شود و پاسخ طبقه بدست می‌آید، سپس با استفاده از این پاسخ و در نظر گرفتن فرکانس تجهیزات ثانویه نمودار پاسخ حداکثر براساس فرکانس سیستم ثانویه رسم می‌شود. این نمودار به طیف پاسخ طبقه معروف است که براساس یک شتابنگاشت خاص بدست می‌آید و از آن می‌توان جهت تحلیل سیستم ثانویه استفاده کرد[۱]، این روش در شکل ۱ بصورت شماتیک نشان داده شده است. در تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سیستم‌های ثانویه در خشکی، نشان داده شده است که این روش برای سیستم‌های ثانویه سبک و سیستم‌هایی که فرکانس ارتعاشی آن‌ها به فرکانس ارتعاشی سازه نزدیک نمی‌باشد قابل قبول است[۲].

آیین‌نامه‌های ساختمانی، مانند UBC97[۳]، IBC2000[۴]، IBC2003[۵]، IBC2006[۶]، FEMA[۷]، NEHRP[۸]، ASCE[۹] و ۲۸۰۰[۱۰] برای محاسبه نیروهای وارده بر سیستم‌های ثانویه از روش بدون اندرکنش استفاده نموده‌اند. در آیین‌نامه طراحی سکوهای دریایی، API RP 2A[۱۱]، برای تحلیل سیستم‌های ثانویه نصب شده بر عرشه سکوهای دریایی روابطی ارائه نشده است و در بند C2.3.6e برای تجهیزات صلب روش بدون اندرکنش پیشنهاد شده است و جهت در نظر گرفتن تنش های ثانوی ناشی از لرزش تجهیزات انعطاف‌پذیر[۱]، مانند؛ تجهیزات سرویس و حفر چاه[۲]، دکل مشعل[۳]، جرثقیل، طره‌ی عرشه[۴]، مخازن بلند، لوله‌ها و رایزها روش با اندرکنش پیشنهاد شده است.

در روش هایی که اندرکنش سیستم ثانویه با سازه ی اصلی در نظر گرفته می شود، سیستم ثانویه به عنوان جزیی از سیستم اولیه (سازه ی اصلی) در نظر گرفته می شود و هر دو سیستم با هم و بصورت یک سیستم مرکب، با در نظر گرفتن جرم و انعطاف پذیری اتصالات سیستم ثانویه، مدل سازی و با یکی از روش های مرسوم تحلیل دینامیکی می شود.



شکل ۱- روش طیف پاسخ طبقه[۱۲]

جهت بررسی لزوم در نظر گرفتن اندرکنش میان سیستم ثانویه و سازه اصلی، برخی محققین روابطی ارائه کرده‌اند، ایگوسا و درکیورگان[۱۳]، براساس نسبت فرکانس سیستم ثانویه به سازه اصلی رابطه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. در چند دهه اخیر تحقیقات مختلفی در خصوص تحلیل سیستم‌های ثانویه انجام شده است. سینگ با استفاده از طیف طرح تراز تکیه‌گاه، طیف طرح طبقه را بدست آورده است[۱]. ویلاورد روشی ساده برای ساده‌سازی روابط تحلیلی سیستم ثانویه یک درجه آزاد ارائه داده است[۱۴]. همچنین فیوض و غفوری آشتیانی نیز روشی ساده در حالت بدون اندرکنش و با اندرکنش برای تحلیل سیستم ثانویه پیشنهاد کرده‌اند[۱۵]. آدام و فوتیو پاسخ سیستم مرکب اولیه-ثانویه غیرالاستیک را بررسی کرده‌اند[۱۶]. ویلاورد برای بررسی پاسخ غیرخطی سیستم‌های ثانویه روابطی کاهشی ارائه کرده است[۱۷]. برخی محققین از جمله، پاولوف و کونستانتین[۱۸] و کلانتری[۱۹]، اثر کاربرد میراگر و جداسازها در سازه را بر روی پاسخ سیستم ثانویه بررسی کرده‌اند.

در زمینه تحلیل سیستم‌های ثانویه نصب شده بر روی سکوهای دریایی، تحقیقات اندکی انجام شده است، از دلایل این مسئله این است که، توسعه سکوهای دریایی در دنیا در مکان‌هایی بوده است که عمدتا سطح خطر لرزه‌ای پایینی دارند و صدمات چندانی ناشی از زلزله در این مکان‌ها بر روی سکوهای دریایی ثبت نشده است[۲۰]. علیرغم این امر بی و بوون براساس روش طیف پاسخ طرح طبقه پاسخ سیستم‌های ثانویه نصب بر سکوهای دریایی را بدست آورده است[۱۲]. کاست و رولند نیز پاسخ سیستم‌های ثانویه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

سکوهای دریایی را مورد ارزیابی قرار داده است[۲۱]. لانگ و انبرگ نیز براساس روش طیف طرح طبقه و با یافتن دوره تناوب انواع جرثقیل‌های عرشه، پاسخ لرزه‌ای عرشه را بدست آورده‌اند[۲۲].

علاوه بر موضوع ضوابط طراحی سیستم‌های ثانویه در سکوهای جدید، ارزیابی لرزه ای سیستم‌های ثانویه در سکوهای دریایی موجود نیز دارای اهمیت زیادی است. بر همین اساس جانسون و اسمیت در مقاله‌ای به بررسی سیستم‌های ثانویه موجود در عرشه سکوهای دریایی و عملکرد آن‌ها در گذشته پرداخته و پیشنهاداتی در خصوص نحوه ارزیابی رفتار لرزه ای و مقاوم سازی آن‌ها ارائه داده اند[۲۳].

با توجه به اینکه در تحلیل سیستم های ثانویه نصب شده بر عرشه سکوهای دریایی، معمولا اندرکنش میان سیستم ثانویه و سازه اصلی در نظر گرفته نمی شود و از روش طیف طرح طبقه استفاده می شود، در این مقاله سعی بر آن شده است تا با مدلسازی انواع مختلفی از سیستم‌های ثانویه نصب شده بر عرشه سکوی جاکت و با در نظر گرفتن اندرکنش سیستم ثانویه و سکو، اثرات دینامیکی این تجهیزات بر سکو مورد ارزیابی قرار بگیرد.

۲- مشخصات سکوی نمونه

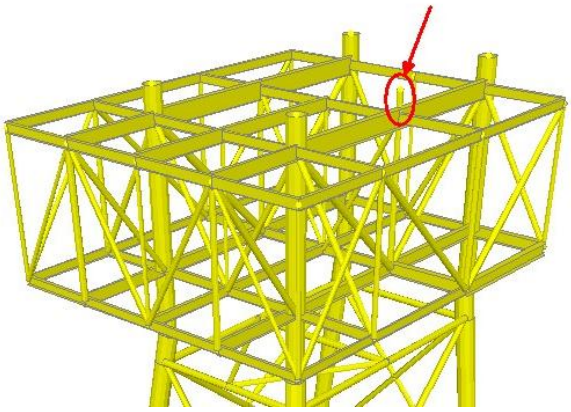
در این مقاله جهت تحلیل سیستم‌های ثانویه نصب شده بر عرشه، یک سکوی نمونه ۴ پایه از نوع جکت که برای نصب در خلیج فارس طراحی شده، مورد استفاده قرار گرفته است. سازه جکت سکوی نمونه از اعضای فولادی لوله‌ای تشکیل شده است. تیرهای عرشه سکو از مقاطع I شکل و دیگر اعضای عرشه از مقاطع لوله‌ای می‌باشند. ارتفاع سازه جکت، از انتهای پایه تا ابتدای تراز عرشه، ۸۸.۴ متر است، که شامل ۴ تراز است. عرشه سکو شامل دو تراز است که اختلاف ارتفاع آن ها ۱۱.۳۴ متر است. پایداری جانبی سکو توسط ۴ شمع تامین شده است که در داخل پایه های لوله ای جکت نصب شده و بوسیله دوغاب، فاصله میان شمع و پایه پر شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی سازه، جرم افزوده و میرایی افزوده ناشی از اندرکنش هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده است، لذا میرایی سازه با احتساب میرایی افزوده برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای محاسبه جرم افزوده، جرم آب هم حجم اعضای لوله ای به اعضا اضافه شده است، ضمنا جرم آب داخل پایه های جکت نیز در محاسبات در نظر گرفته شده است. جهت در نظر گرفتن جرم سازه و تجهیزات عرشه، این جرم که برابر ۵۰۰۰ تن بوده به صورت یکنواخت بین اعضای عرشه توزیع شده است.

برای مدل‌سازی شمع سکو، از مدل تیر طره معادل[۵] استفاده شده است. در این روش، شمع‌ها در عمق خاصی در زیر سطح زمین به صورت گیردار فرض می‌شوند و از مدل کردن خاک صرفنظر می‌شود. طول تیر معادل که به آن عمق گیرداری[۶] گفته می‌شود، ۷ برابر قطر پایه در نظر گرفته شده است. شکل ۲ مدل عرشه سازه را نشان می دهد.

۲-۱- سیستم ثانویه

سیستم ثانویه بر روی تراز دوم عرشه مطابق با شکل ۲ مدل‌سازی شده است. جهت انتخاب موقعیت سیستم ثانویه حالتی مد نظر قرار گرفته شده است که بحرانی باشد، از این رو موقعیت مکانی آن میان پایه‌های عرشه در نظر گرفته شده است تا اثرات مولفه قائم زلزله در پاسخ سیستم واضح تر مشاهده شود.

برای در نظر گرفتن حالات مختلف سیستم ثانویه، ۳ مقدار مختلف برای جرم متمرکز در نظر گرفته شده و جهت مدل‌سازی تکیه‌گاه آن، لوله ای با مشخصات مکانیکی متغیر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب برای هر جرم ۴ حالت سختی تکیه گاه بدست آمده که در مجموع سیستم ثانویه ۱۲ حالت مختلف خواهد داشت، که از حالت نرم به حالت سخت تغییر پیدا می‌کند. حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده و دوره تناوب سیستم ثانویه در دو جهت افقی و قائم در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: عرشه سکوی دریایی و تکیه‌گاه سیستم ثانویه مدل شده بر روی آن

جدول ۱- مشخصات دینامیکی سیستم ثانویه

جرم(تن)	مدول الاسیسیته تکیه‌گاه($\frac{KN}{m^2}$)	دوره تناوب در جهت افقی(s)	دوره تناوب در جهت قائم(s)
۵۰	۳۰۰۰۰۰۰۰	۰/۴۸۶	۰/۰۹۴
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۱۸۸	۰/۰۳۶
	۸۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۹۴	۰/۰۱۸
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴
۲۵۰	۳۰۰۰۰۰۰۰	۱/۰۸۶	۰/۲۱
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۴۲۱	۰/۰۸۱
	۸۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۲۱	۰/۰۴۱
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۰۰۸
۵۰۰	۳۰۰۰۰۰۰۰	۱/۵۳۶	۰/۲۹۷
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۵۹۵	۰/۱۱۵
	۸۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۲۹۷	۰/۰۵۸
	۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۵۹	۰/۰۱۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

۲-۲- انتخاب نرم‌افزار و مدلسازی

جهت مدل‌سازی سکوی نمونه از نرم‌افزار متن باز OpenSees[۲۴] استفاده شده است. این نرم‌افزار یکی از قویترین نرم‌افزارهای تحلیل سازه‌ها است که دارای قدرت، دقت و سرعت بالای آنالیز، مخصوصا در حوزه رفتار غیر خطی است.

در مدل‌سازی، مقاطع لوله‌ای بصورت مقاطع فایبر معرفی شده‌اند. المان‌های جکت از نوع المان‌های تیر-ستون غیرخطی[۷] با پلاسیسیته گسترده می‌باشند. مصالح استفاده شده برای اعضای جکت و شمع‌ها فولاد می‌باشد. شکل دستور ساخت مصالح فولاد مورد نظر در نرم‌افزار OpenSees به صورت زیر است:

uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b $R0 $cR1 $cR2

که پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$matTag: شماره مشخص کننده ماده مورد نظر

$Fy: تنش تسلیم ماده مورد نظر

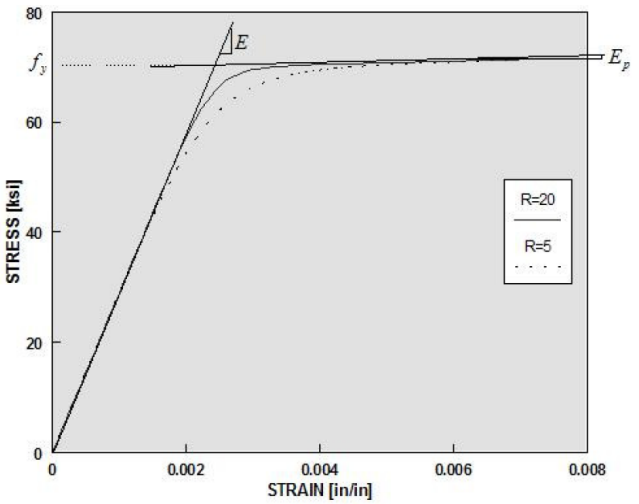
$E: مدول الاسیسیته اولیه

$b: نسبت سخت‌شدگی مجدد

$R0 $cR1 $cR2: پارامترهایی هستند که انتقال از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک را کنترل می‌کنند. مقادیر توصیه شده برای R0 بین ۱۰ تا ۲۰، برای cR1 برابر ۰.۹۲۵ و برای cR2 برابر ۰.۱۵ است.

شکل رفتاری مصالح به کار رفته در مدلسازی در شکل ۳ آمده است.

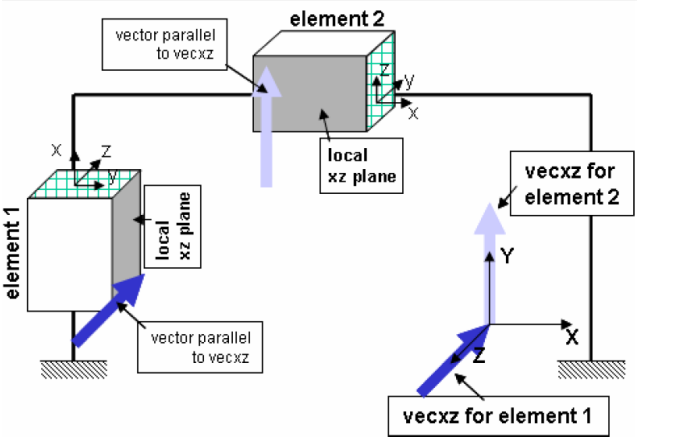
در این نرم‌افزار جهت در نظر گرفتن پیچش برای مقاطع لوله‌ای، لازم است سختی پیچشی، GJ، به مقاطع اضافه گردد، که این کار برای هر کدام از مقاطع انجام شده است.



شکل ۳- نمودار تنش کرنش ماده[۲۴]

محل الیاف در مقاطع با استفاده از مختصات محلی آن‌ها تعیین می‌شود و سپس در حل کلی سازه به مختصات کلی تبدیل می‌شود.

این عمل در نرم‌افزار با استفاده از دستور Transformation انجام می‌شود. شکل نمونه عمل انتقال هندسی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- نحوه انتقال هندسی [۲۴]

برای تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی، سه روش در این نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. اولین روش، روش خطی می‌باشد که در آن مختصات اولیه المان را بدون در نظر گرفتن تغییر شکل در اثر نیروهای وارد شده به المان به وجود می‌آید، به مختصات کلی تبدیل می‌کند. روش دوم اثر P-Δ را در تبدیل دستگاه مختصات در نظر می‌گیرد و روش سوم که به روش Corotationl معروف است، دستگاه مختصات محلی را در هر مرحله با توجه به تغییر مکان و شیب ناشی از بار وارده به المان تغییر می‌دهد و یا آن را به روز می‌کند. این روش قادر است که اثر تغییر شکل‌های بزرگ مانند پدیده کمانش را در نظر بگیرد. در این مقاله از روش سوم تبدیل مختصات استفاده شده است.

۲-۳- صحت سنجی مدل

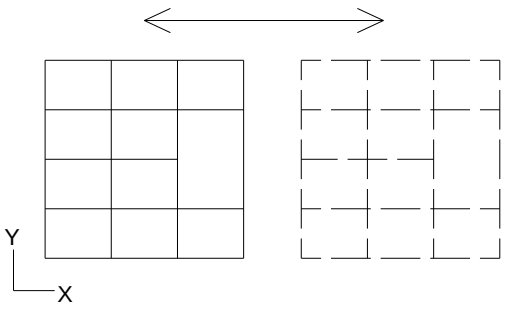
جهت صحت‌سنجی مدل ساخته شده در نرم‌افزار OpenSees، سازه در نرم‌افزار SACS نیز مدل شده است اشکال مودی و دوره تناوب آن‌ها در دو نرم‌افزار مقایسه شده است.

نتایج نشان داده‌اند که تطابق خوبی میان نتایج مدل سازه در نرم‌افزار OpenSees و SACS وجود دارد و حداکثر تفاوت حدود ۶ درصد بین نتایج دو نرم‌افزار وجود دارد که می‌تواند به خاطر تفاوت‌های مدل‌سازی در دو نرم‌افزار باشد.

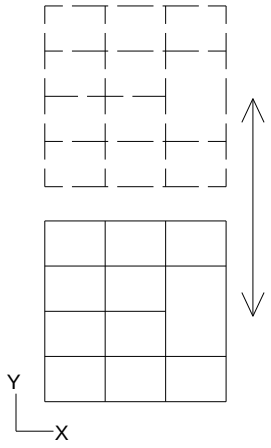
در شکل ۵، ۳ مود اول ارتعاشی سازه نمایش داده شده است. دوره تناوب اصلی سکو در حالتی که جرم سیستم ثانویه ۵۰ تن است، ۲/۰۳ بدست آمده است و همچنین دوره تناوب دو مود دوم و سوم نیز ۱/۶۸ و ۱/۲۹ حاصل شده است. ضمنا در حالتی که جرم سیستم ثانویه ۲۵۰ و ۵۰۰ تن در نظر گرفته شده است، دوره تناوب اصلی برابر ۲/۰۴ و ۲/۰۵ بدست آمده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

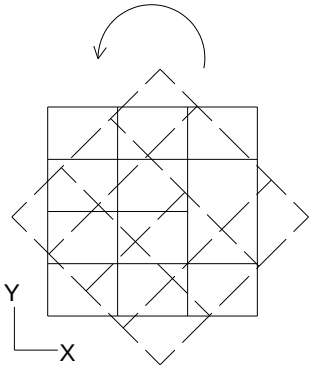
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]



الف)



ب)



ج)

شکل ۵- شکل مود ارتعاشی سازه. الف) مود اول ب) مود دوم ج) مود سوم

۲-۴- شتابنگاشت‌های اعمالی به سازه

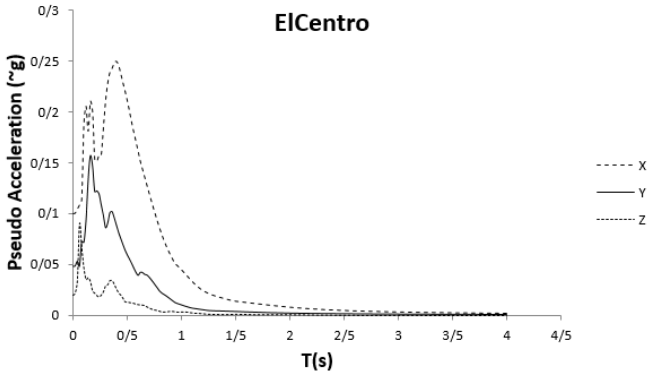
برای تحلیل لرزه‌ای سکوها، ۷ شتابنگاشت مختلف انتخاب شده است و این شتابنگاست‌ها بصورت همزمان در سه جهت به نقاط انتهایی شمع معادل اعمال شده‌اند. در انتخاب شتابنگاشت‌ها، خاک نوع c طیف طرح آیین‌نامه API RP 2A[۱۱]، مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات شتابنگاشت‌های انتخابی در جدول ۲ آمده است.

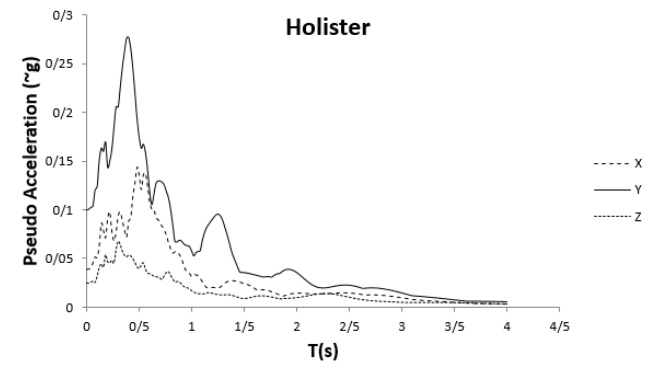
جدول ۲- مشخصات شتابنگاشت‌های انتخابی

نام شتابنگاشت	Vs (m/s)	PGA (g)		
		X	Y	z
ElCentro	۱۸۸/۸	۰/۱۵۱۶	۰/۰۷۳۲	۰/۰۳۰۴
Holister	۱۹۸/۸	۰/۰۷۸	۰/۲۰۱۱	۰/۰۵۰۲
LomaPrieta760	۱۲۶/۴	۰/۱۰۵۱	۰/۱۲۰۶	۰/۰۷۰۲
LomaPrieta780	۱۶۹/۷	۰/۱۴۳۱	۰/۰۹۶۴	۰/۰۶۱۸
Northridge958	۲۳۴/۹	۰/۱۲۳۳	۰/۱۲۲۸	۰/۰۵۰۱
Northridge1069	۲۷۱/۴	۰/۰۸۵۴	۰/۰۹۵۹	۰/۰۴۳
Tabas	۲۷۴/۵	۰/۰۸۶۸	۰/۱۰۹۲	۰/۰۵۱۸

۳- پاسخ سیستم ثانویه در زلزله سطح مقاومت

برای مطالعه اثرات زلزله بر این سازه در سطح مقاومت، با توجه به اعداد متداول شتاب طرح در منطقه خلیج فارس، شتابنگاشت‌های انتخاب شده به 0.1g مقیاس شده‌اند. یادآور می‌شود در این سطح از زلزله، سازه دارای رفتار خطی بوده و سیستم ثانویه نیز در حوزه رفتار خطی باقی می‌ماند. شکل ۶، طیف شتاب نگاشت‌های اعمالی به سازه را پس از مقیاس شدن نشان می‌دهد. در این تحقیق هر سه مولفه زلزله، x، y و z، به سازه اعمال شده است.



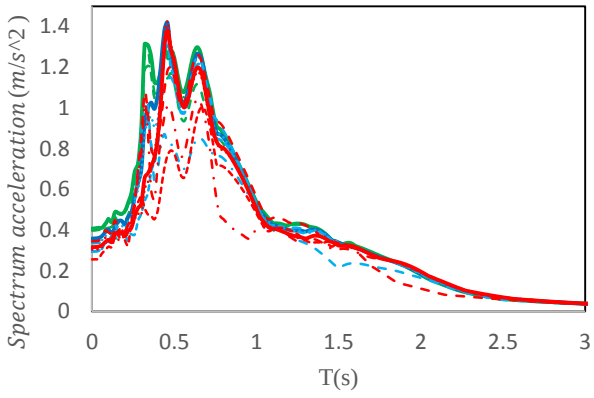


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

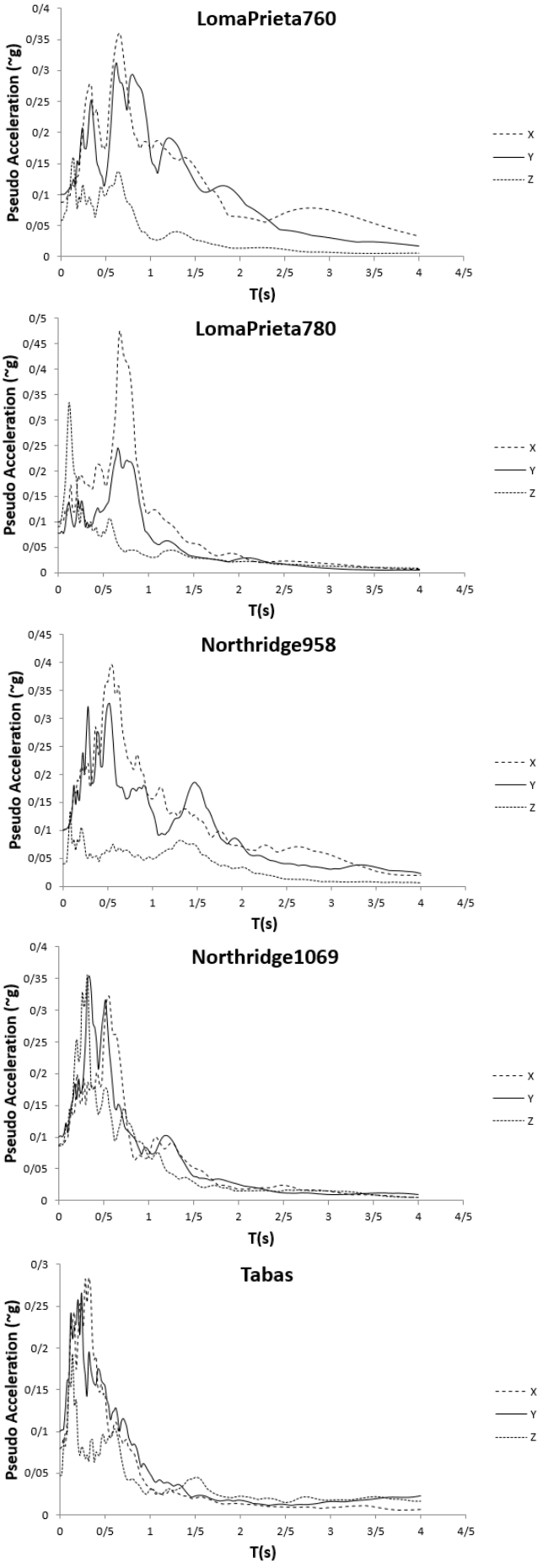
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

پس از اعمال شتابنگاشت‌ها به سازه، طیف پاسخ شتاب عرشه در حالت‌های مختلف بدون اندرکنش و با اندرکنش حاصل شده است. در شکل ۷ طیف پاسخ شتاب عرشه در جهت افقی و با در نظر گرفتن میرایی ۵ درصد آورده شده است.

در این نمودارها سه حالت جرمی، ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ تن برای جرم سیستم ثانویه، به ترتیب با رنگ های سبز، آبی و قرمز، در نظر گرفته شده است و در هر حالت جرمی، ۵ حالت مختلف در نظر گرفته شده است، حالت اول، که با رنگ تیره ممتد مشخص شده است، حالتی است که تنها جرم سیستم ثانویه مدل شده است و از اندرکنش میان سیستم ثانویه و سکو صرفنظر شده است. در ۴ حالت دیگر، تکیه‌گاه سیستم ثانویه نیز مدل شده است. در هر کدام از این حالت‌ها، برای در نظر گرفتن تغییرات دوره تناوب سیستم ثانویه، مدول الاسیسیته تکیه‌گاه سیستم ثانویه تغییر کرده است، که به تبع آن، دوره تناوب تکیه‌گاه سیستم ثانویه از حالت نرم به حالت سخت تغییر وضعیت می‌دهد. سختی جانبی تکیه‌گاه سیستم ثانویه $K = \frac{3EI}{L^3}$ در نظر گرفته شده است، که E مدول الاسیسیته تکیه‌گاه، I ممان اینرسی مقطع و L برابر طول تکیه‌گاه (۲ متر است. با این تفاسیر، دوره تناوب سیستم ثانویه ($T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$)، برای حالت جرمی ۵۰ تن، از ۰/۰۲ تا ۰/۴۹ ثانیه، برای حالت جرمی ۲۵۰ تن، از ۰/۰۴ تا ۱/۰۹ ثانیه و برای حالت جرمی ۵۰۰ تن، از ۰/۰۶ تا ۱/۵۴ ثانیه عوض می‌شود.



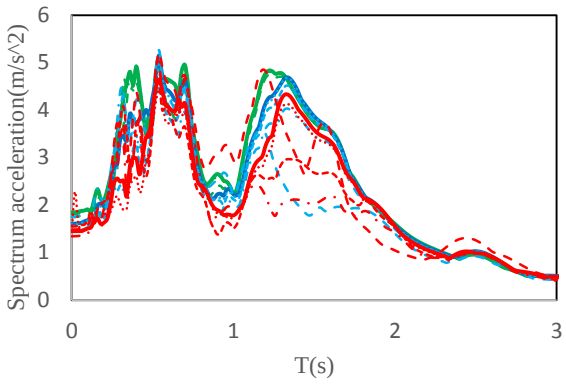
الف)



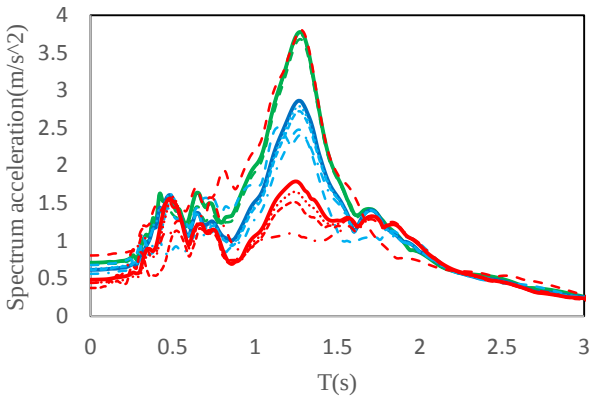
شکل ۶- طیف شتابنگاشت‌های اعمالی به سکو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

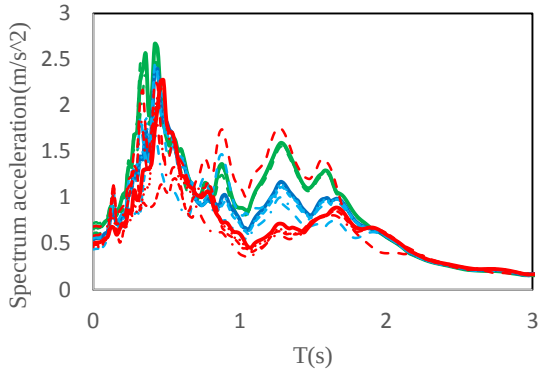
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]



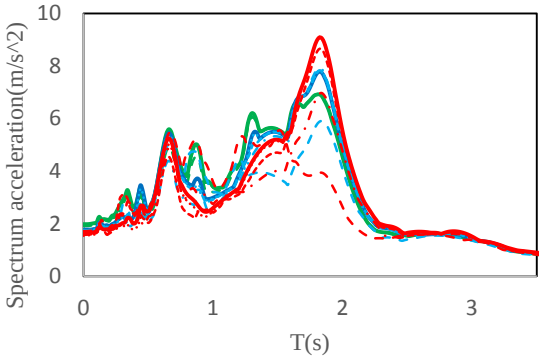
و)



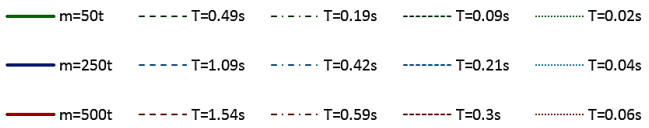
ب)

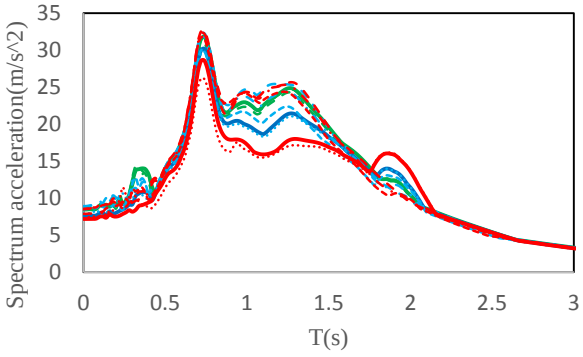


ز)

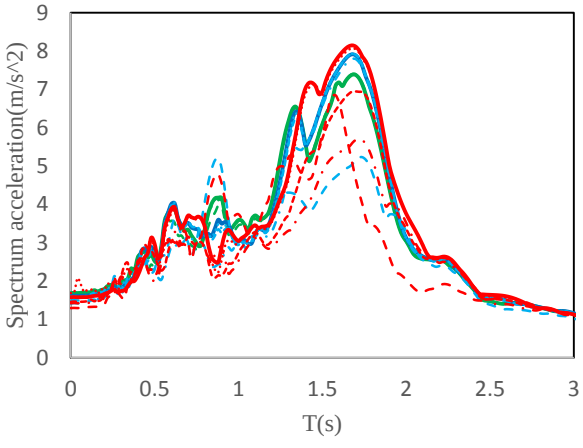


ج)





د)



ه)

شکل ۷- طیف پاسخ شتاب تراز عرشه در جهت افقی. الف) ElCentro ب) Holister ج) LomaPrieta760 د) LomaPrieta780 ه) Northridge958 و) Northridge1069 ز) Tabas

همانطور که از نمودارها مشخص است، در حالت جرمی ۵۰ تن اختلاف میان حالت بدون اندرکنش با حالت با اندرکنش چندان زیاد نیست و در این حالت می‌توان از اثر اندرکنش صرفنظر نمود، اما با بیشتر شدن جرم سیستم ثانویه و به تبع آن افزایش نرمی سیستم ثانویه، اختلاف‌ها میان حالت با اندرکنش و حالت بدون اندرکنش بیشتر می‌شود، بطوریکه در حالت جرمی ۵۰۰ تن این اختلاف کاملا برای سیستم ثانویه با بیشترین دوره تناوب، ۱/۵۴ ثانیه، کاملا مشهود است.

در بررسی پاسخ ها یکی از مواردی که انتظار می رود در نتایج مشاهده شود، این است که در زمان دوره تناوب اصلی سکو، تشدید در پاسخ‌ها رخ دهد، اما این مسئله در همه‌ی شتابنگاشت‌ها مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر این است که در دوره تناوب اصلی سکو، طیف شتابنگاشت‌های اعمالی به سکو، مقدار ناچیزی دارند و به همین جهت در این شتابنگاشت‌ها، در دوره تناوب اصلی سکو

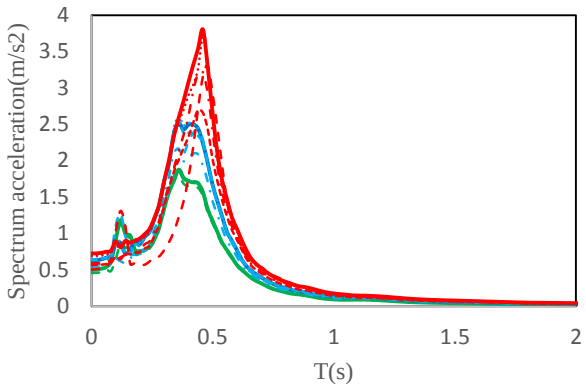
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

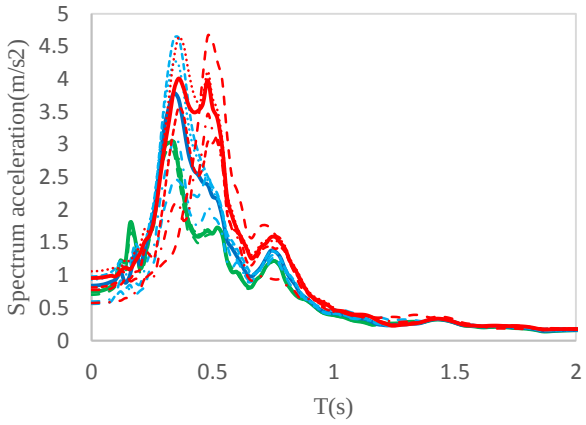
تشدید رخ نمی‌دهد و طیف پاسخ تراز عرشه نیز مقدار قابل ملاحظه ای ندارد، اما در دو شتابنگاشت LomaPrita760 و Northridge958 (شکل)، در دوره تناوب حدود ۲ ثانیه قله ملاحظه می‌شود که این مسئله سبب بروز تشدید در طیف پاسخ تراز عرشه، در حدود دوره تناوب ۲ ثانیه، شده است (شکل).

در این تحقیق شتابنگاشت ها در دو جهت افقی و یک جهت قائم به سازه اعمال شده اند و نتایج جهت قائم نیز حاصل شده است. در شکل ۸، طیف پاسخ شتاب عرشه در جهت قائم آورده شده است. در این نمودارها، مانند حالت افقی، سه حالت جرمی در نظر گرفته شده است و در هر حالت جرمی، مقدار دوره تناوب سیستم ثانویه در جهت قائم تغییر پیدا می کند. سختی تکیه‌گاه در حالت قائم برابر $K = \frac{EA}{L}$ است که، A مساحت مقطع تکیه‌گاه می‌باشد. در این حالت، مانند حالت افقی، تنها مدول الاسیسیته تکیه‌گاه عوض می‌شود. مطابق با نتایج حاصله، در دو حالت جرمی ۵۰ و ۲۵۰ تن، با بیشتر شدن دوره تناوب سیستم ثانویه، تفاوتی میان حالت با اندرکنش با حالت بدون اندرکنش ملاحظه نمی شود و تنها در حالت جرمی ۵۰۰ تن، با بیشتر شدن دوره تناوب سیستم ثانویه، اختلاف میان حالت با اندرکنش با حالت بدون اندرکنش قابل تشخیص است، که این اختلاف پاسخ اندک است و مانند پاسخ در جهت افقی قابل ملاحظه نیست. در نتایج حاصله، طیف پاسخ ها دارای دو قله می باشند که یکی مربوط می شود به قله طیف شتابنگاشت زلزله و دیگری که در حدود ۰/۵ ثانیه است مربوط می شود به مود ارتعاشی قائم. مطابق با نمودارها، با افزایش جرم سیستم ثانویه، قله به سمت راست کشیده می شود که نشاندهنده بیشتر شدن دوره تناوب ارتعاش قائم می باشد.

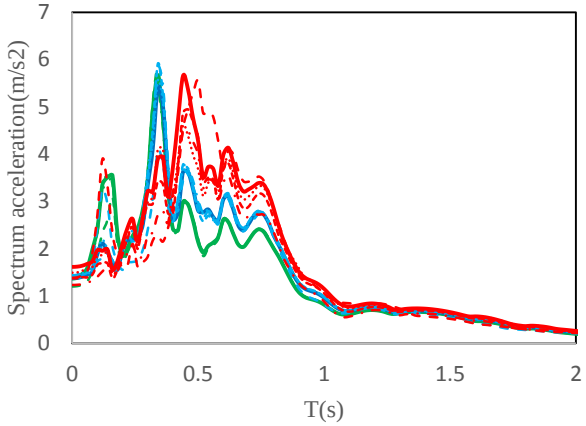
در شتابنگاشت‌های قائم، به دلیل اینکه در بازه دوره تناوب ارتعاشی قائم، میزان طیف شتابنگاشت زلزله قابل ملاحظه است، در پاسخ‌های بدست آمده، قله ملاحظه شده و تشدید حاصل می‌شود، بنابراین ارتعاش قائم در این شتابنگاشت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در صورتیکه در ارتعاش افقی، به دلیل ماهیت شتابنگاشت‌های زلزله در جهت افقی، چندان این مسئله ملاحظه نمی‌شود.



الف)



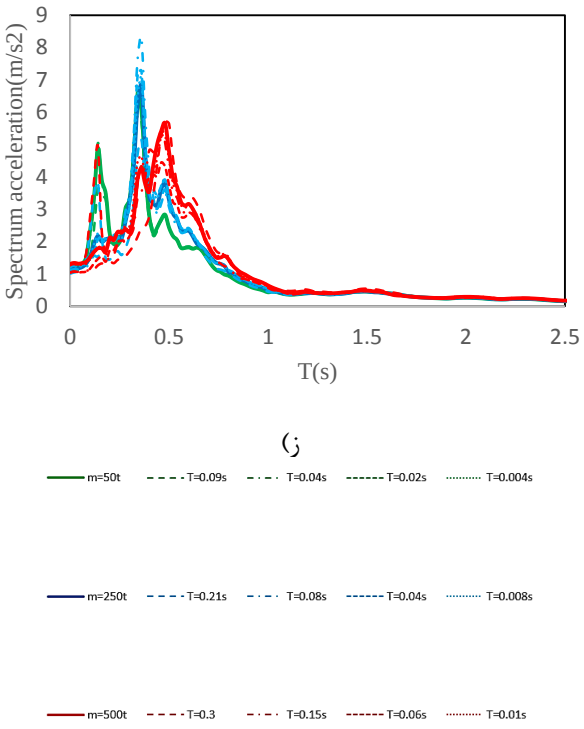
ب)



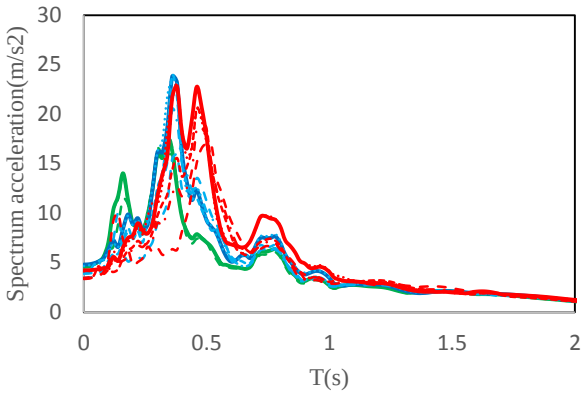
ج)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

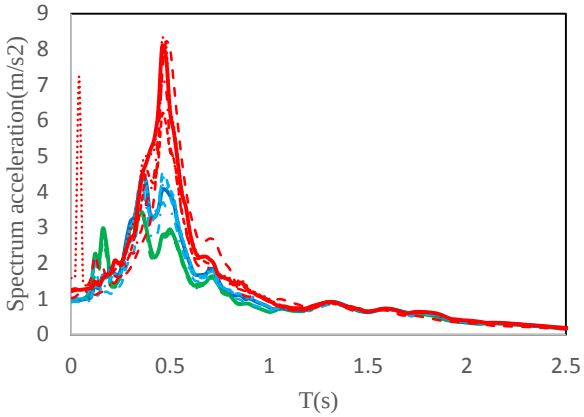
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]



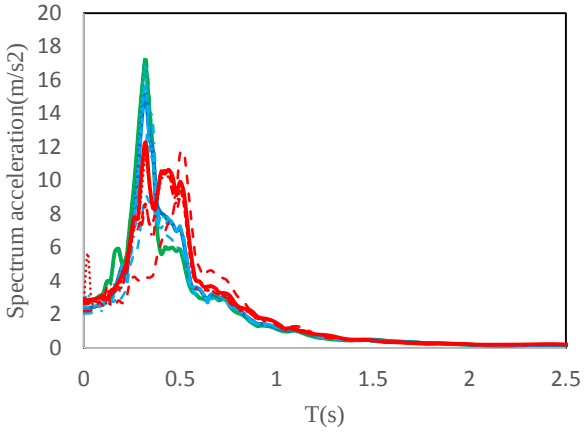
ز)



د)



ه)



و)

شکل ۸- طیف پاسخ شتاب تراز عرشه در جهت قائم. الف) ElCentro ب) Holister ج) LomaPrieta760 د) LomaPrieta780 ه) Northridge958 و) Northridge1069 ز) Tabas

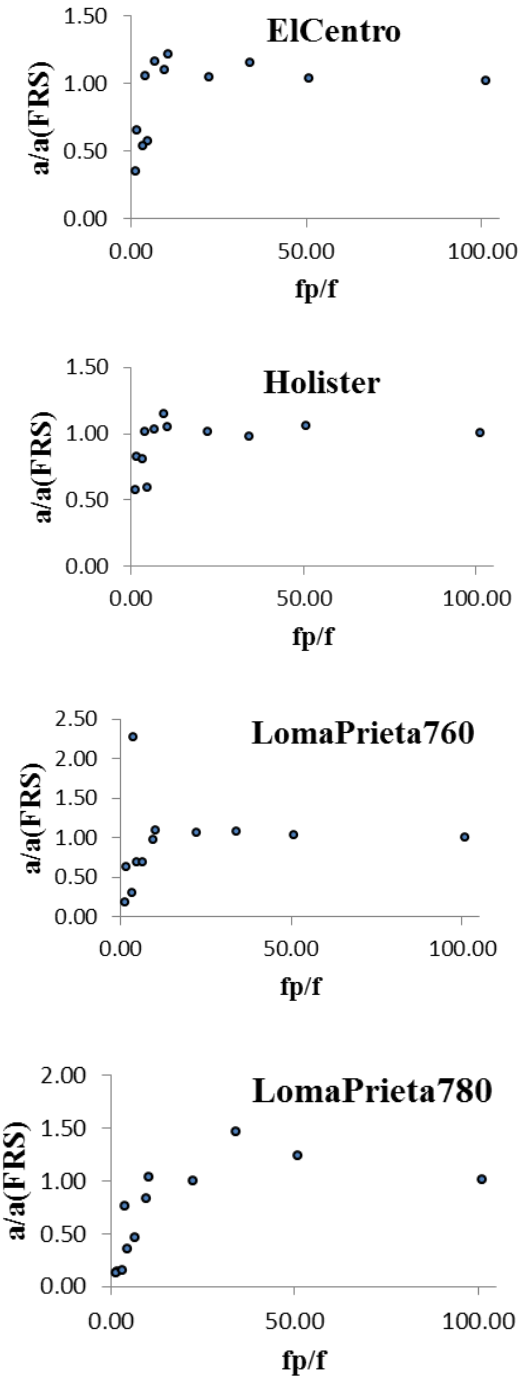
۳-۱-مقایسه نتایج روش طیف طبقه با تحلیل دینامیکی

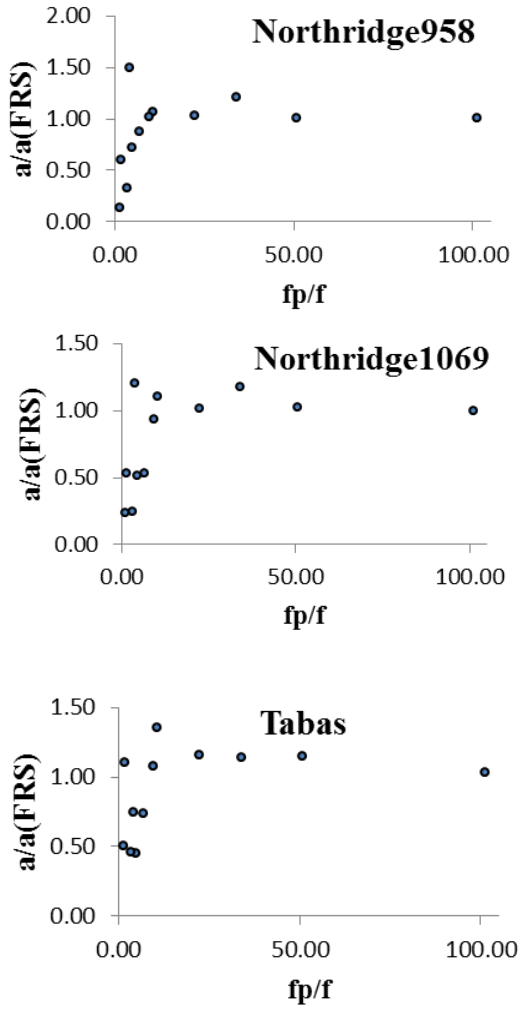
در روش معمول استفاده از روش طیف طبقه، طیف پاسخ تراز عرشه در حالتی که تنها جرم سیستم ثانویه بر روی عرشه قرار گرفته، در نظر گرفته می‌شود. سپس با دانستن دوره تناوب سیستم ثانویه، از روی طیف پاسخ تراز عرشه، حداکثر شتاب سیستم ثانویه بدست می‌آید، در نتیجه در این روش اندرکنش بین سیستم ثانویه و سازه اصلی در نظر گرفته نمی‌شود. در حالت دوم که اندرکنش در نظر گرفته می‌شود، جرم و سختی تکیه‌گاه سیستم ثانویه مدل شده و شتاب سیستم ثانویه مستقیما با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی مدلی که شامل سازه اصلی و سیستم ثانویه است بدست می‌آید. مطابق با نتایج بدست آمده، در حالت جرمی ۵۰ تن، به جز دو مورد، در باقی موارد، پاسخ بدست آمده از روش طیف طبقه کمتر از حالتی است که اندرکنش در نظر گرفته می شود. در این حالت جرمی حداکثر اختلاف بدست آمده میان این دو روش ۵۶ درصد حاصل شده است و در باقی موارد اکثرا اختلاف بدست آمده اندک و قابل چشم پوشی است. در حالت جرمی ۲۵۰ و ۵۰۰ تن، عمدتا پاسخ های حالت روش طیف طبقه، محافظه کارانه بدست آمده است، بدین مفهوم که پاسخ روش طیف طبقه بیشتر از حالت با اندرکنش حاصل شده است، که در برخی موارد تا ۵۰۰ درصد اختلاف مشاهده می شود، که این به معنی این است که در روش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

طیف طبقه، ۴۰۰۰ کیلو نیوتن نیروی اضافه به سازه اعمال می شود.

برای مقایسه بهتر نتایج، در شکل ۹ نسبت شتاب بدست آمده از روش با اندرکنش به روش طیف طرح طبقه برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی آمده است.





شکل ۹: نسبت شتاب افقی روش با اندرکنش به روش طیف طبقه برحسب نسبت فرکانس سیستم ثانویه به فرکانس سکو

در تحقیق حاضر با توجه به اعداد منظور شده برای مشخصات سازه و سیستم ثانویه حداقل این نسبت فرکانسی برابر ۱/۴۷ و حداکثر آن نیز ۱۰۱/۳می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در نسبت فرکانسی کمتر از ۷ (دوره تناوب سیستم ثانویه بیشتر از ۰/۳ ثانیه)، عمدتا نسبت شتاب‌ها کمتر از ۱ بدست آمده‌اند که نشاندهنده محافظه‌کارانه بودن روش طیف طرح طبقه است.در نسبت‌های فرکانسی بالاتر، نسبت شتاب‌ها بیشتر از ۱ حاصل شده‌اند. مفهوم دیگر این نتیجه این است که، هرچه سیستم ثانویه نرم تر شود، پاسخ های حالت روش طیف طبقه، محافظه کارانه خواهد بود. همچنین در حالتی که نرمی سیستم ثانویه کم می شود پاسخ حالت روش طیف طبقه کمتر از مقداری است که اندرکنش در نظر گرفته می شود.

پاسخ شتاب در جهت قائم نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج نشاندهنده اختلاف اندک میان روش طیف طبقه با روش در نظر گرفته شده اندرکنش است.

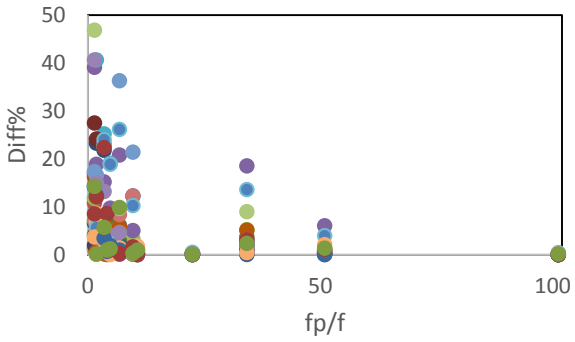
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

۳-۲- عکس العمل تکیه گاهی در برابر تحریک زلزله

در این تحقیق، عکس العمل تکیه گاهی سکو تحت اثر شتابنگاشت های مختلف و در حالت های مختلف سیستم ثانویه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق با نتایج حاصله، عمده ی اختلاف ها میان روش طیف طبقه و حالت با اندرکنش بصورت محافظه کارانه است و در برخی موارد تا ۴۷٪ اختلاف مشاهده شده است. این نتایج نشاندهنده این است که رفتار سیستم ثانویه بر روی رفتار کلی سکو نیز تاثیر گذار است و می تواند در طراحی سکو اثر گذار باشد. در صورتیکه سیستم ثانویه بصورت صحیح مدل شود می تواند پاسخ ها را واقعی تر کند و به دلیل اینکه عمده ی اختلاف ها محافظه کارانه می باشند، می تواند طراحی یک سکو را اقتصادی تر نماید.

در شکل ۱۰ درصد اختلاف میان روش با اندرکنش و بدون اندرکنش بصورت نمودار، برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی نشان داده شده است.



شکل ۱۰: درصد اختلاف عکس العمل تکیه‌گاهی در دو روش با اندرکنش و بدون اندرکنش در سه جهت برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی

۴- پاسخ سیستم در زلزله سطح رفتار غیرخطی

سکوهای دریایی علاوه بر مقابله در برابر زلزله در سطح مقاومت با رفتار خطی، می باید در برابر زلزله های شدید و نادر منطقه که زلزله سطح رفتار غیرخطی نامیده می شود مقاومت نمایند. اگرچه در هر منطقه ویژگی های زلزله نادر براساس مطالبات تحلیل خطر بدست می آید و برای مناطق خلیج فارس شتاب حداکثر در این سطح از زلزله عموما کمتر از ۰/۲ g می‌باشد، لیکن در این تحقیق برای دست یابی به رفتار غیرخطی سازه، در هر شتابنگاشت، حداکثر شتاب زمین آنقدر افزایش داده شده است تا سازه رفتار غیرخطی از خود بروز دهد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که برای هر شتابنگاشت، سازه بعد از یک حداکثر شتاب زمین مشخص، رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، که این مقدار حداکثر، که سازه را وارد رفتار غیر خطی می‌کند به ماهیت شتابنگاشت بستگی دارد. در جدول ۴، حداکثر شتاب زمین برای هر شتابنگاشت مشخص شده است. در این هفت شتابنگاشت، شتابنگاشت ElCentro و Tabas به دلیل ماهیت خود شتابنگاشت‌ها، سازه در مقداری ازPGA که بزرگتر از 1g است، وارد رفتار غیرخطی می شود. بنابراین در این تحقیق از این دو شتابنگاشت صرفنظر شده است و پاسخ آن‌ها مورد ارزیابی قرار نگرفته است. دلیل این امر این است که در بازه دوره تناوب اصلی سازه، اختلاف میان طیف پاسخ این شتابنگاشت‌ها با طیف طرح آیین‌نامه API RP 2A [۱۱]، که مبنای طراحی این سکوها بوده، زیاد است. به همین دلیل سازه در مراتب بالاتری از حداکثر شتاب زمین وارد رفتار غیرخطی می‌شود. در تحقیق حاضر در تحلیل سازه ها تحت اثر ۵ رکورد مقیاس شده ذکر شده در جدول ۳، علاوه بر رفتار سازه، رفتار سیستم ثانویه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است، در این سطح از زلزله در برخی از موارد حالت جرمی ۵۰۰ تن ، سیستم ثانویه رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد که در نتایج در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: حداکثر شتاب زمین در نظر گرفته شده برای شتابنگاشت‌ها

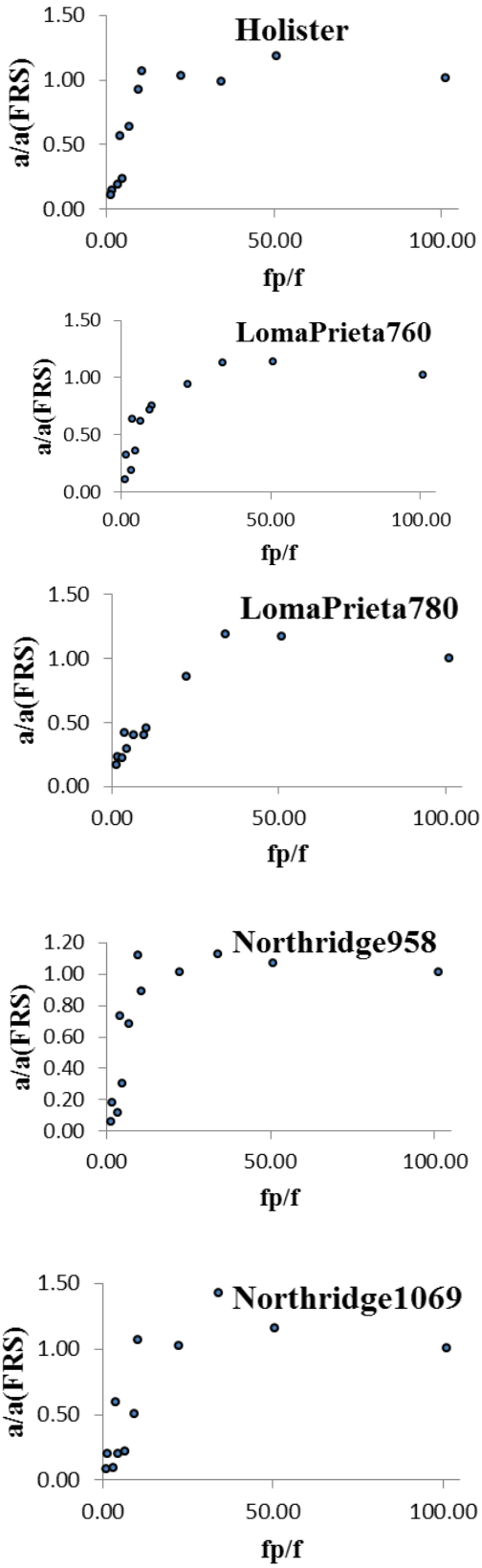
شتابنگاشت	PGA(~g)
Holister	۰/۹
LomaPrieta760	۰/۸
LomaPrieta780	۰/۴
Northridge958	۰/۷
Northridge1069	۰/۴

در شکل ۱۱، نسبت شتاب افقی در حالت تحلیلی دینامیکی با در نظر گرفتن اندرکنش به مقدار آن در روش طیف طرح طبقه برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سکو آمده است. در این حالت در نسبت‌های فرکانسی کوچکتر از ۱۰، پاسخ حالت بدون اندرکنش عمدتا محافظه‌کارانه بدست آمده است، در حالیکه در حالت زلزله سطح مقاومت، این نسبت فرکانسی برابر ۷ بدست آمده بود.

همانطور که از نتایج مشخص است، در حالتی که سازه وارد رفتار غیرخطی می‌شود، اختلاف روش طیف طرح طبقه با حالت با اندرکنش، نسبت به حالت خطی، افزایش پیدا کرده است. مطابق با نتایج، در سطح رفتار غیرخطی، حداکثر اختلاف پاسخ سیستم ثانویه در روش طیف طبقه با روش با اندرکنش ۱۵ برابر حاصل شده است که این مقدار اختلاف ۱۶۰۰۰ کیلونیوتن نیروی اضافه به سازه اعمال خواهد کرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

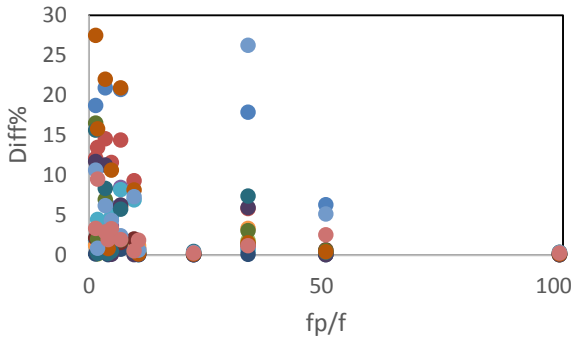


شکل۱۱: نسبت شتاب افقی روش با اندرکنش به روش طیف طبقه برحسب نسبت فرکانس سیستم ثانویه به فرکانس سکو

۴-۱- عکس العمل تکیه گاهی سازه

در سطح رفتار غیرخطی در همه ی شتابنگاشت ها به جز شتابنگاشت Northridge1069، مقدار اختلاف پاسخ میان دو روش طیف طبقه و با اندرکنش کمتر شده است، که این نشان دهنده این مسئله است که با وجود اینکه سازه وارد رفتار غیرخطی شده است، اما عملکرد سیستم ثانویه کمتر بر رفتار کلی سازه تاثیر گذار است.

در شکل۱۲ درصد اختلاف میان روش با اندرکنش و بدون اندرکنش بصورت نمودار، برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است حداکثر درصد اختلاف ۲۷٪ است که از حداکثر مقدار حالت خطی کمتر است.



شکل ۱۲: درصد اختلاف عکس العمل تکیه‌گاهی در دو روش با اندرکنش و بدون اندرکنش در سه جهت برحسب نسبت فرکانسی سیستم ثانویه به سازه اصلی

۵- نتیجه‌گیری

به صورت کلی به عنوان نتیجه‌گیری از این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) در سیستم ثانویه با دوره تناوب کم، می‌توان از اندرکنش میان سیستم ثانویه و سکو صرفنظر کرد و تنها جرم سیستم ثانویه را بر عرشه سکو قرار داد، اما در حالت‌های با دوره تناوب بیشتر سیستم ثانویه، لازم است که اندرکنش میان سیستم ثانویه و سکو در نظر گرفته شود.

۲) در صورت در نظر نگرفتن اندرکنش میان سیستم ثانویه و سکو، در دوره تناوب‌های بالای سیستم ثانویه، پاسخ‌های بدست آمده غیرواقعی خواهند بود و این اختلاف بسته به سختی سیستم ثانویه و ماهیت شتابنگاشت وارد بر سازه، می‌تواند چشم‌گیر باشد، البته این اختلاف بیشتر محافظه‌کارانه خواهد بود و پاسخ حالت با در نظر گرفتن اندرکنش، کمتر از پاسخ در حالت در نظر نگرفتن اندرکنش است.

۳) در دوره تناوب‌های پایین، عمدتا پاسخ حالت روش طیف طبقه کمتر از پاسخ حالت با اندرکنش بدست می آید، البته این اختلاف عمدتا ناچیز و قابل صرفنظر کردن است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

۴) در صورتیکه مقادیر طیف پاسخ شتابنگاشت وارد شده به سازه، در دوره تناوب های نزدیک به زمان تناوب سازه، قابل ملاحظه باشد، تشدید رخ می‌دهد.

۵) در حالتی که سازه رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، اختلاف پاسخ‌های میان حالت با اندرکنش و بدون اندرکنش، به مراتب بیشتر از حالتی است که سازه رفتار خطی دارد. اما در رفتار کلی سازه، نتیجه عکس حاصل شده است، بدین معنی که اختلاف پاسخ روش طیف طبقه و حالت با اندرکنش، نسبت به حالت خطی کمتر بدست آمده است.

کلید واژگان

1- Compliant
2- Drilling and well servicing structures
3- Flare boom
4- Deck cantilever
5- Equivalent Cantilever Model
6- Depth of Fixity
7- Nonlinear Beam-Column Elements

۶- مراجع

1- Mehandra P. Singh (1975), *Generation of seismic floor spectra*, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.101, pp 593-607.

2- Fiouz, A, (2002), *Analysis of Secondary Systems Subjected to Multicomponent Earthquake Accelerations And Proposing Simplified Methods*, A Thesis Presented For the Degree of Ph.D. in Structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, (In Persian).

3- Uniform Building Code (1997), *Structural Engineering Design Provisions*, UBC Vol.2. International Code Council (ICC).Washington, D.C.

4- International Code Council (ICC) (2000), *International Building Code*, Washington, D.C.

5- International Code Council (ICC) (2003), *International Building Code*, Washington, D.C.

6- International Code Council (ICC) (2006), *International Building Code*, Washington, D.C.

7- Applied Technology Council (ATC) (1997), *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Rep. FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

8- Building Seismic Safety Council (BSSC) (2004), *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures-2003 edition*, Rep. FEMA450, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

9- ASCE/SEI 7-10 (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineering, Virginia.

10- Institute of Standards and Industrial Research of Iran, (2205), *Seismic Design Code for Buildings*, 3rd edition, Iran, (In Persian).

11- American Petroleum Institute. (2005), *Recommended Practice for planning,designing and constructing Fixed Offshore Platforms-working stress design*, (API-RP2A-WSD) 21st ed. AmericanPetroleum Institute,Washington D.C.

12- Robert Bea, Charles Bowen (1995), *Simplified eqrthquake floor response spectra for equipment on offshore platforms*, Proceeding of the International Workshop on wind

13- Igusa, T., and Derkiureghian, A (1985) *Dynamic characterization of two-degree-of-freedom equipment structure systems*, J. Eng.Mech., ASCE, Vol.111, No.1, 1-19.

14- Villaverde R (1997),*Method to improve seismic provisions for nonstructural components in buildings*, J.Str.Eng. ASCE, Vol.123, No.4, pp 432-439.

15- Fiouz, A, Ghafouri, M, (2003), *Simple Method Analysis of Secondary Systems*, 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, (In Persian).

16- C. Adam, P. A. Fotiu (2000), *Dynamic analysis of inelastic primary-secondary systems*, Engineering Structures, No.22, pp. 58-71.

17- Roberto Villaverde (2006), *Simple method to estimate nonlinear response of nonstructural components in buildings*, Journal of Engineering Structures, Vol.28,Issue 8, pp 1209-1221.

18- Eleni Pavlou and Michael C. Constantinou (2006), *Response of Nonstructural Components in Structures with Damping Systems*, Journal of Structural Engineering, Vol.132, No.7.

19- Kalantary, A, (2007), *A study of the effect of base isolation together with passive and semi active control on reducing the risk of sliding and overturning of secondary systems of building*, 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, (In Persian).

20- Robert C.Visser (1992), *Operations issues seismic design and reassessment*, Proceeding of the International Workshop on Seismic design and reassessment of offshore structures, California Institute of Technology.

21- Garrison Kost, Roland L. Sharpe (1977), *Seismic-Resistant design of piping, equipment, and appurtenances for offshore structures*, Offshore Technology Conference, OTC. 2750,Houston, Texas.

22- J.R. Long, M.J. Effenberger (1989), *Seismic evaluation of platform cranes*, Offshore Technology Conference, OTC 2750, Houston, Texas.

23- Gayle S.Johnson and Charles E.Smith (1997), *Seismic evaluation of topsides systems on existing platforms*, Offshore Technology Conference, OTC 8424.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]

24- Mazzoni, S., McKenna, F., Fenves, G.L (2006), *Opensees Manual*, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.6.0]